

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

УДК 621.436-634:502.17

DOI: 10.30977/АТ.2219-8342.2018.42.0.5

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВОПОДАЧИ И РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ НА ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Кухаренок Г.М., Березун В.И.,  
Белорусский национальный технический университет

**Аннотация.** Рассмотрены основные направления стратегии снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизельных двигателей. Установлены параметры, оказывающие определяющее воздействие на протекание рабочего процесса. Определены основные подходы, позволяющие организовать протекание рабочего процесса с учетом современных представлений о сгорании в дизельных двигателях и снижении «сырого» выброса.

**Ключевые слова:** рабочий процесс, выбросы вредных веществ, рециркуляция, параметры топливоподачи, регрессионные зависимости.

### Введение

Дизельные двигатели, применяемые на автомобильном транспорте, внедорожной технике, в качестве энергетических установок и т.д., являются одним из существенных источников загрязнения окружающей среды. В связи с этим во всем мире на законодательном уровне ограничивают выбросы вредных компонентов отработавших газов (ОГ): оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), оксидов углерода (СО), углеводородов (ТНС) и дисперсных частиц (РМ).

### Анализ публикаций

Нормы выбросов загрязняющих веществ для грузовых транспортных средств в Республике Беларусь гармонизированы с евро-

пейским и международным законодательствами. В их основе заложены требования Правил ЕЭК ООН №№ 24, 49 и 96.

Постоянно ужесточающиеся требования экологической безопасности определили появление ряда направлений достижения выбросов вредных веществ, совокупность которых представляет стратегию снижения выбросов (рис. 1). Из всех регламентируемых выбросов для дизельных двигателей наиболее сложным в достижении является одновременное снижение оксида азота ( $\text{NO}_x$ ) и дисперсных частиц (РМ). Ввиду того, что эти параметры находятся в обратной зависимости друг от друга, совершенствование двигателя представляет собой сложный процесс [1, 2].

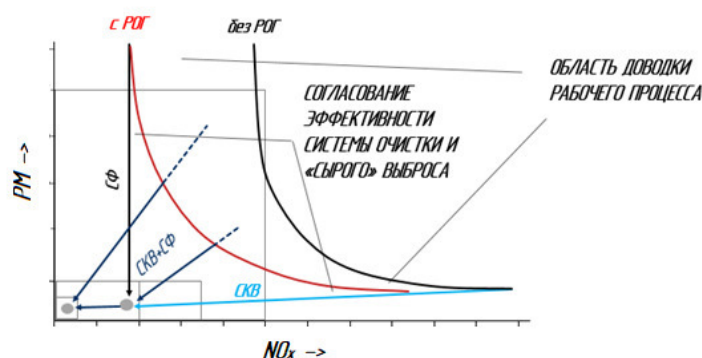


Рис. 1. Стратегия достижения современных требований экологической безопасности: СФ — сажевый фильтр; СКВ — селективно-каталитическое восстановление; РОГ — рециркуляция отработавших газов

С учетом того, что достижение современных экологических норм, помимо рассмотрения средств совершенствования рабочего процесса, необратимо связано с использованием систем очистки отработавших газов, выделяют три основных направления стратегии:

– доводка рабочего процесса в сторону снижения выбросов  $\text{NO}_x$ , а возрастающие при этом выбросы РМ снижают за счет применения технологии сажевых фильтров (СФ);

– доводка рабочего процесса в сторону снижения выбросов РМ, а возрастающие при этом выбросы  $\text{NO}_x$  снижают за счет применения технологии селективно-каталитического восстановления (СКВ);

– комбинированный способ снижения выбросов вредных веществ.

Выбор между подходами зависит от области применения и режимов эксплуатации транспортного средства, наличия качественного малосернистого дизельного топлива, доступности реагентов на заправочных станциях и т.д.

Многие известные производители, ограниченные временем вступления промежуточных стадий экологических норм и рассматривая рабочий процесс двигателя как основной источник снижения выбросов вредных веществ, исследовали новейшие технологии топливopодачи с давлением впрыска выше 200 МПа и высокопроизводительные системы наддува, в дальнейшем заявляя о необходимости применения современных экспериментальных систем для выполнения перспективных требований экологического законодательства. Максимальное давление сгорания в цилиндре в такой комплектации находится на уровне 20 МПа, что предполагает внедрение сложных технических решений, обеспечивающих более надежный газо-жидкостный стык, большую прочность деталей двигателя и производительность системы охлаждения. Однако, начиная с норм Евро-4 и Stage 3В, обеспечить экологические выбросы только за счет совершенствования рабочего процесса становится проблематично, поэтому мировые производители на двигателях высокого технического уровня активно внедряют системы очистки ОГ [3]. С учетом развития технологий очистки, постановка задачи модифицировалась в сторону нахождения компромисса между сложностью (как следствие – удорожанием конструктивных элементов двигателя) и совершенствованием технологии очистки.

С другой стороны, применение систем очистки ОГ с большой эффективностью позволяет получить высокие экологические показатели на двигателях более низкого технического уровня, отличающихся простотой конструкции, с относительно высокими «сырыми» выбросами вредных веществ. Как правило, спрос на такую продукцию возникает у потребителей внедорожной техники, значительно удаленных от сервисных центров и вынужденных самостоятельно обслуживать технику в полевых условиях. Недостатком такого решения является более высокий расход топлива и дорогая система нейтрализации ОГ с высоким уровнем вложений драгоценных металлов, необходимых для обеспечения компенсации ухудшения показателей ввиду ускоренного снижения эффективности системы при работе с высокой степенью конверсии.

Рекомендаций по определению соотношения между необходимой степенью совершенствования рабочего процесса дизеля и степенью сложности технологии очистки ОГ, с точки зрения создания комплексной сбалансированной системы, в современных научных работах не предлагается. В связи с этим возникает неопределенность в сфере определения граничных условий параметров, определяющих характер протекания рабочего процесса, для каждого режима цикла токсичности. Решение этого вопроса в призмe рассмотрения обеспечения результирующего значения выбросов с учетом топливной экономичности является одной из важнейших задач совершенствования рабочего процесса.

Рассмотрев работы по совершенствованию рабочего процесса в совокупности с направлениями стратегии снижения выбросов вредных веществ, следует выделить неизменяющиеся конструктивные параметры и регулировочные (оперативные) параметры, варьируемые в процессе работы двигателя (рис. 2). Причем перевод параметров в изменяющиеся в зависимости от режима работы повышает потенциал снижения выбросов вредных веществ, однако снижает надежность и долговечность двигателя.

Доводка двигателей внутреннего сгорания представляет собой процесс поиска компромисса между уровнем «сырого» выброса и эффективностью системы очистки ОГ, зависящей не только от конфигурации и наполнения самой системы, но и от температуры ОГ.



Рис. 2. Параметры, оказывающие определяющее воздействие на протекание рабочего процесса и выброс вредных веществ

Температура ОГ, в свою очередь, также зависит от процессов, протекающих внутри цилиндра и формирующих непосредственно сырой выброс вредных веществ.

Опыт в доводке рабочего процесса показывает, что эффективность настроек при различных сочетаниях конструктивных элементов не совпадает. Ввиду чего наиболее остро ставится вопрос выработки подхода к определению рациональных настроек регулировочных параметров при различной комплектации двигателя.

Среди рассмотренных факторов особого внимания заслуживают параметры: давление впрыска, угол опережения впрыска и степень РОГ ввиду определяющего влияния на выбросы вредных веществ и топливно-экономические показатели. Вместе с тем смещение диапазона эффективных значений варьируемых параметров определяется базовыми конструктивными параметрами двигателя. В связи с этим применение аккумуляторных систем впрыска позволяет осуществлять гибкое управление давлением впрыска и углом опережения впрыска без усложнения конструкции, а в совокупности с применением системы РОГ позволяет согласовать между собой конструктивные параметры двигателя на различных режимах работы.

Выделенные параметры достаточно подробно исследованы в научных публикациях, однако ужесточение законодательства по отношению к дизельным двигателям в свете современной стратегии снижения выбросов вредных веществ требует уточнения их взаимного влияния на экологические и топливно-экономические показатели.

### Цель и постановка задачи

Целью работы является улучшение экологических и топливно-экономических показателей за счет совершенствования рабочего процесса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести анализ направлений стратегии по снижению выбросов вредных веществ и параметров, оказывающих воздействие на протекание рабочего процесса; выбрать конструктивные и регулировочные параметры дизелей высокого экологического уровня.

### Выбор конструктивных и регулировочных параметров дизеля, систем топливоподачи и РОГ

Для обеспечения современного уровня топливно-экономических и экологических показателей объекта исследования: тракторного дизельного двигателя 4СН11/12,5 мощностью 90 кВт с рециркуляцией отработавших газов (РОГ) – была проведена работа по выбору базовых конструктивных параметров двигателя с учетом тенденций развития двигателестроения.

Основные тенденции согласования формы камеры сгорания и конфигурации распылителя изображены на рис. 3 и заключаются в одновременном увеличении диаметра горловины, угла раскрытия шатра факела и количества отверстий распылителя.

При этом, исходя из условия сохранения степени сжатия и необходимости реализации возросшей дальнобойности топливной струи за счет увеличения  $P_{впр}$ , глубина камеры сгорания (КС) уменьшается с образованием

вытеснителя в центральной части при диаметре горловины 67,6 мм [4, 5].

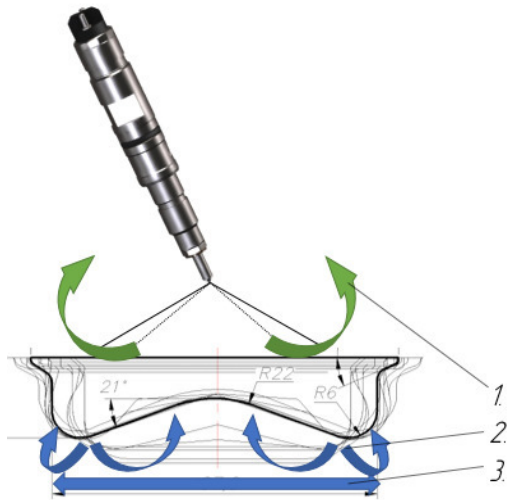


Рис. 3. Тенденции согласования формы камеры сгорания и конфигурации распылителя: 1 – увеличение угла раскрытия топливных факелов; 2 – увеличение глубины КС с образованием вытеснителя; 3 – увеличение диаметра горловины КС

Увеличение  $P_{впр}$  позволяет сместить процесс в сторону объемного смесеобразования и снизить газодинамические потери за счет изменения конструкции головки блока цилиндров в сторону снижения вихревого отношения впускных каналов до 3,75 (рис. 4) [1, 6].

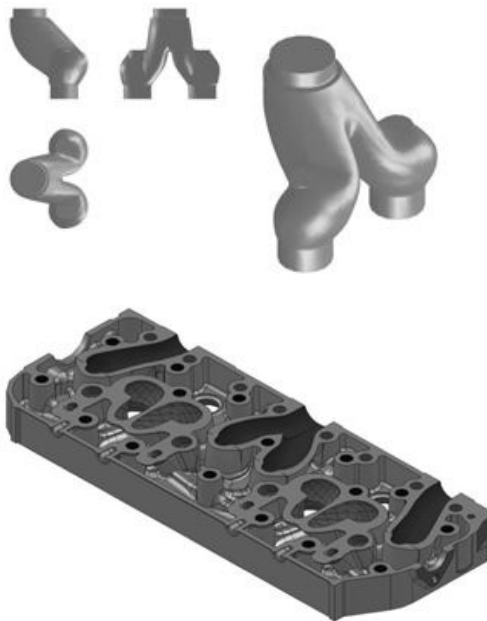


Рис. 4. Объёмные модели стержня впускного канала и ГБЦ

По итогам работ по исследованию различных способов организации РОГ выбрана регулируемая РОГ по контуру высокого давления с охлаждением пропускаемых ОГ (рис. 5) [7].

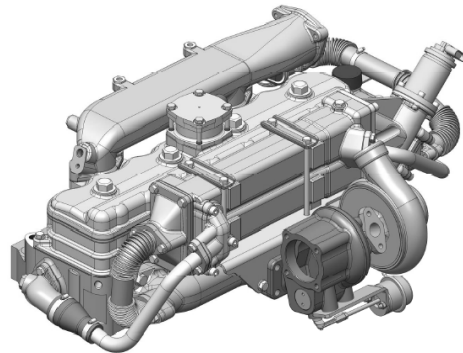


Рис. 5. Система РОГ по контуру высокого давления

В результате проведенных работ были выбраны конструктивные параметры КС, распылителя, головки блока цилиндров и системы РОГ объекта исследования. Совершенствование конструктивных параметров без согласования с оперативно изменяющимися в процессе работы двигателя параметрами позволяет лишь оценить общие тенденции изменения экологических и топливно-экономических показателей. Согласовать же несколько конструктивных параметров ввиду взаимного влияния друг на друга является сложной задачей, решить которую можно лишь при выработке подхода выбора регулировочных параметров управления рабочим процессом.

Для выбора регулировочных параметров систем топливоподачи и РОГ проведено моделирование рабочего процесса на всех характерных точках цикла NRSC по методике, приведенной в работе [3]. По результатам исследования, проведенного согласно ортогонального плана-эксперимента с учетом возможности объекта исследования, построены регрессионные зависимости оценочных параметров (ОП), в качестве которых выбраны  $NO_x$ ,  $PM$ ,  $g_e$  от регулировочных параметров  $P_{впр}$ ,  $\theta$ ,  $\rho_p$

$$\begin{aligned} \text{ОП} = & K_{\rho_p^2} \cdot \rho_p^2 + K_{P_{впр}^2} \cdot P_{впр}^2 + K_{\theta^2} \cdot \theta^2 - K_{P_p} \cdot \rho_p - \\ & - K_{P_{впр}} \cdot P_{впр} - K_{\theta} \cdot \theta + K_{\rho_p P_{впр}} \cdot (\rho_p \cdot P_{впр}) - \\ & - K_{\rho_p \theta} \cdot (\rho_p \cdot \theta) - K_{P_{впр} \theta} \cdot (P_{впр} \cdot \theta) + K_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $K_{\rho_p^2}$  – коэффициент регрессии при  $\rho_p^2$  с учетом приведения;  $K_{P_{впр}^2}$  – коэффициент регрессии при  $P_{впр}^2$  с учетом приведения;  $K_{\theta^2}$  – коэффициент регрессии при  $\theta^2$  с учетом приведения;  $K_{\rho_p}$  – коэффициент регрессии при  $\rho_p$  с учетом приведения;  $K_{P_{впр}}$  – коэффициент регрессии при  $P_{впр}$  с учетом приведения;  $K_{\theta}$  – коэффициент регрессии при  $\theta$  с учетом приведения;  $K_{\rho_p P_{впр}}$  – коэффициент

регрессии при  $(\rho_p \cdot P_{впр})$  с учетом приведения;  $K_{\rho_p \theta}$  – коэффициент регрессии при  $(\rho_p \cdot \theta)$  с учетом приведения;  $K_{P_{впр} \theta}$  – коэффициент регрессии при  $(P_{впр} \cdot \theta)$  с учетом приведения;  $K_0$  – свободный член регрессионной зависимости.

Коэффициенты регрессии оценочных параметров для номинального режима приведены в табл.1.

Таблица 1 – Коэффициенты регрессии оценочных параметров для номинального режима с учетом приведения

Коэффициенты регрессии	Оценочные параметры		
	$g_e$	$NO_x$	PM
$K_{\rho_p^2}$	1008,78	83,54	16,15
$K_{P_{впр}^2}$	0,00	0,00	0,00
$K_{\theta^2}$	0,20	0,02	0,00
$K_{\rho_p}$	16,48	3,25	3,90
$K_{P_{впр}}$	-0,82	0,04	-0,01
$K_{\theta}$	-10,34	-0,15	-0,01
$K_{\rho_p P_{впр}}$	-0,84	-0,26	-0,03
$K_{\rho_p \theta}$	-3,23	-2,37	-0,05
$K_{P_{впр} \theta}$	0,04	0,00	0,00
$K_0$	337,96	-0,25	0,67

Полученные регрессии позволили провести выбор параметров топливоподачи и степени РОГ по принципу нелинейной оптимизации с учетом требуемого экологического уровня и топливной экономичности. По результатам исследования влияния параметров топливоподачи и РОГ на выбросы вредных веществ определены три основных подхода в области настройки рабочего процесса: минимизация  $NO_x$ , PM и  $g_e$ . Анализ регрессионных зависимостей выброса вредных веществ от регулировочных параметров показывает целесообразность использования высокого давления впрыска за счет перераспределения  $\theta$  и  $\rho_p$ . Так, для различных значений  $NO_x$  минимизировать PM рационально при низких значениях  $\rho_p$  за счет выбора  $\theta$ . Минимальный выброс  $NO_x$  при различном уровне PM удастся реализовать за счет изменения  $\rho_p$  при  $\theta$ ,

находящихся в нижнем диапазоне границ исследования. Минимизировать  $g_e$  на номинальном режиме позволяет использование РОГ на уровне 8–11 % при обеспечении нахождения коэффициента избытка воздуха в диапазоне значений заведомо выше порога дымления, но ниже 2–2,2.

### Выводы

Выбраны конструктивные параметры системы РОГ, распылителя, впускных каналов, головки блока цилиндров и камеры сгорания для дизельных двигателей высокого экологического класса.

Получены значения регулировочных параметров, позволившие сформировать алгоритм управления электронным блоком управления и обеспечить достижение «сырого» выброса дисперсных частиц ниже

0,025 г/кВт·ч, соответствующего уровню Stage 4.

### Литература

1. Кухаренок Г.М. Обеспечение экологических показателей уровня ЕВРО-4 и ЕВРО-5 на автомобильных дизелях Минского моторного завода / Г.М. Кухаренок, С.П. Севиздрал, В.И. Березун // Вести автомобильно-дорожного института. – 2012. – №1(14). – С. 95–105.
2. Кухаренок Г.М. Сокращение выбросов вредных веществ дизельными двигателями / Г.М. Кухаренок, В.И. Березун // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов. – 2013. – С. 314–323.
3. Кухаренок Г.М. Снижение выбросов вредных веществ дизельных двигателей: монография / Г.М. Кухаренок, А.Н. Петрученко, В.И. Березун. – М.: Новое знание, 2014. – 220 с.
4. Кухаренок Г.М. Выбор формы камеры сгорания дизельного двигателя / Г.М. Кухаренок, А.Н. Петрученко, В.И. Березун // Вестник СевНТУ. – 2014. – С. 65–68.
5. Кухаренок Г.М. Выбор формы камеры сгорания дизельного двигателя с низкой интенсивностью впрыска / Г.М. Кухаренок, В.И. Березун // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов, 2014. – С. 180–184.
6. Березун В.И. Влияние вихревого отношения впускных каналов на показатели двигателя / В.И. Березун // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й МНТК. – 2014. т. 2. – С. 45–46.
7. Кухаренок Г.М. Выбор параметров системы рециркуляции отработавших газов / Г.М. Кухаренок, В.И. Березун // Наука и техника. – 2014. – № 1. – С. 57–63.

### References

1. Kukharenek, G.M., Sevizdral, S.P. Berезun, V.I. (2012). Obespechenie ekologicheskikh pokazatelei urovnya EVRO-4 i EVRO-5 na avtomobilnykh dizelyakh Minskogo motornogo zavoda [Ensuring environmental indicators at the level of EURO-4 and EURO-5 on automobile diesel engines of the Minsk Motor Plant]. *Vesti avtomobil'no-dorozhnogo instituta*, 1(14), 95-105 [in Russian].

2. Kukharenek, G.M., Berезun, V.I. (2013). Sokrashchenie vybrosov vrednykh veshchestv dizelnymi dvigatelyami [Reduction of emissions of harmful substances by diesel engines]. *Sovershenstvovanie organizatsii dorozhnogo dvizheniya i perevozok passazhirov i gruzov - Improving the organization of road traffic and passenger and cargo transportation*, 314-323 [in Russian].
3. Kukharenek, G.M., Petruchenko, A.N., Berезun, V.I. (2014). Snizhenie vybrosov vrednykh veshchestv dizel'nykh dvigatelei [Reduction of emissions of harmful substances of diesel engines]. Moscow: *Novoe znanie* [in Russian].
4. Kukharenek, G.M., Petruchenko, A.N., Berезun V.I. (2014). Vyor formy kamery sgoraniya dizel'ogo dvigatelya [Choice of the shape of the combustion chamber of a diesel engine]. *Vesnik SevNTU - Bulletin SevNTU*, 65-68 [in Russian].
5. Kukharenek, G.M., Berезun, V.I. (2014). Vyor formy kamery sgoraniya dizelnogo dvigatelya s nizkii intensivnost'yu vpryska [Choice of the shape of the combustion chamber of a diesel engine with a low injection rate]. *Sovershenstvovanie organizatsii dorozhnogo dvizheniya i perevozok passazhirov i gruzov - Improving the organization of road traffic and passenger and cargo transportation*. Minsk: BNTU, 180-184 [in Russian].
6. Berезun, V.I. (2014). Vliyanie vikhrevogo otnosheniya vpusknykh kanalov na pokazateli dvigatelya [Influence of vortex ratio of intake channels on engine performance]. *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy 12-i MNTK – Science – education, industry, economics: Processing of 12<sup>th</sup> ISPC*, t. 2, 45-46 [in Russian].
7. Kukharenek, G.M., Berезun, V.I. (2014). Vyor parametrov sistemy otrabotavshikh gazov [Selecting the parameters of the exhaust gas recirculation system]. *Nauka i tekhnika - Science and technology*, 1, 57-63 [in Russian].

**Кухаренок Георгий Михайлович, д.т.н., проф., кафедра двигателей внутреннего сгорания, Белорусский национальный технический университет, ул. Я. Коласа, 12, 220013, г. Минск, Республика Беларусь, тел. +3751729281-86, e-mail: kux@tut.by**

**Березун Виталий Иванович, зам. гл. конструктора ОАО «Управляющая компания холдинга**

«Минский моторный завод», инж., Минский моторный завод, ул. Ваупшасова, 4, 220070, г. Минск, Республика Беларусь, тел. +37517230-36-36, e-mail: vitaliy.berezun@gmail.com.

#### INFLUENCE OF FUEL SUPPLY PARAMETERS AND EXHAUST GAS RECIRCULATION ON DIESEL EMISSIONS

Kukharenok G., Belarusian National Technical University, Berazun V., OJSC «Minsk Motor Plant» Holding Manading Company

**Abstract.** Diesel engines used in road transport and other power plants are the sources of environmental pollution. Therefore, it is necessary to search for new approaches to the working process organization that allow reducing emissions of harmful substances in exhaust gases: nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), carbon oxides (CO), hydrocarbons (THC) and particulate matter (PM). **Problem.** The most difficult problem to fulfil the standard requirements to the emission of harmful substances in exhausted gases of diesel engines is simultaneous reduction of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and particulate matter (PM), due to the fact that these parameters are inversely related. **Goal.** The purpose of the research is to improve the ecological and fuel-economic parameters owing to working process improvement, determine the engine rational adjustment parameters: fuel injection pressure; fuel injection advance angle; degree of recirculation of exhaust gases; design parameters: the shape of the combustion chamber and the configuration of the injector nozzle, the controlled exhaust gases recirculation (EGR) over the high pressure circuit with cooling of the bypassed exhaust gas. **Methodology.** To choose adjusting parameters of the fuel supply system and the EGR, modeling of working process at all characteristic points of the NRSC cycle is carried out. **Results.** The minimum NO<sub>x</sub> emission at a different PM level is realized by changing the fuel injection pressure, the fuel injection advance angle and the EGR degree that is in the lower range of the study boundaries. Reduction of specific effective fuel rate at the nominal mode has been obtained due to the used EGR at the level of 8-11%. **Originality.** Based on the results of the research, the regressive dependencies of the change in the evaluation parameters NO<sub>x</sub>, PM, g<sub>e</sub> on the adjusting parameters (fuel injection pressure, the fuel injection advance angle and the EGR degree) which contribute to reducing fuel consumption and decreasing emissions of harmful substances from exhaust gases have been constructed. **Practical value.** Adjustment parameters which ensure the particulate matter emission corresponding to the level of Stage 4 have been obtained. **Key words:** working process, harmful substances emissions, recirculation, fuel supply parameters, regression dependencies.

#### ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПАЛИВОПОДАЧІ І РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ НА ВИКИДИ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ДИЗЕЛІВ

Кухарьонек Г.М., Білоруський національний технічний університет, Березун В.І., ОАО «Управляющая компания холдинга «Минский моторный завод»

**Анотація.** Дизельні двигуни, що застосовуються на автомобільному транспорті та інших енергетичних установках, є джерелами забруднення навколишнього середовища. Тому необхідно шукати нові підходи до організації робочого процесу, які дозволяють знизити викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах (ВГ): оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), оксидів вуглецю (CO), вуглеводнів (THC) і дисперсних часток (PM). Для виконання нормативних вимог щодо викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами дизельних двигунів найбільш складною проблемою є одночасне зниження оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) і дисперсних частинок (PM), внаслідок того, що ці параметри знаходяться у зворотній залежності один від одного. Метою дослідження є покращення екологічних і паливно-економічних показників за рахунок вдосконалення робочого процесу, визначення раціональних регульовальних параметрів двигуна: тиску впорскування палива; кута випередження впорскування палива; ступеня рециркуляції відпрацьованих газів, конструктивних параметрів: форми камери згоряння і конфігурації розпилювача, регульованої рециркуляції відпрацьованих газів (РВГ) по контуру високого тиску з охолодженням перепуску ВГ. Для вибору регульовальних параметрів систем подачі палива і РВГ проводиться моделювання робочого процесу на всіх характерних точках циклу NRSC. Мінімальний викид NO<sub>x</sub> за різного рівня РМ реалізується за рахунок зміни тиску впорскування палива, кута випередження впорскування палива і ступеня РВГ, що знаходяться у нижньому діапазоні меж дослідження. Зниження питомої ефективної витрати палива (g<sub>e</sub>) на номінальному режимі отримано за рахунок використання РВГ на рівні 8–11 %. За результатами дослідження побудовані регресивні залежності зміни оціночних параметрів: NO<sub>x</sub>, РМ, g<sub>e</sub> від регульовальних параметрів: тиску впорскування палива, кута випередження впорскування палива і ступеня РВГ, що сприяють зниженню витрати палива та скороченню викидів шкідливих речовин із ВГ. Отримано регульовальні параметри, які забезпечують викиди дисперсних часток, що відповідають рівню Stage 4.

**Ключові слова:** робочий процес, викиди шкідливих речовин, рециркуляція, параметри паливоподачі, регресивні залежності.